

## 論文の内容の要旨

論文題目	生物の二関節間筋腱複合体を規範とした脚ロボットの開発
学位 申請者	佐藤 隆紀
<p>脚式ロボットにおいて生物のような俊敏な運動を実現することは挑戦的な課題である。生物の高度な運動技能は、進化の中で最適化された身体の筋骨格構造の持つ柔軟性と、それらを協調的に利用する運動制御によって成し遂げられる。生物の筋骨格系の構成要素である筋腱複合体は、能動要素である筋と受動要素である腱が直列に接続され、関節を駆動するだけでなく、運動中にエネルギーの蓄積と放出を行う能力を持つ。走行や跳躍といった運動において、生物はその運動エネルギーを筋腱複合体の持つ弾性要素に弾性エネルギーを蓄積し、蹴り出しなどの高出力が要求される際に適切に放出して、俊敏かつ高効率な運動を実現していることが示唆されている。また、二関節にまたがるように配置された筋腱複合体は、大きな駆動源を持つ体幹から手足の先端へのエネルギーの伝達を可能にする。この機能は体幹から末梢につれて細く軽量になる生物のスマートな構造を形成するために重要であり、俊敏な動作の実現に大きく貢献する。一方で、これまでに開発された脚式移動ロボットは、制御の煩雑化を防ぎ、また設計を単純化するために、剛体のボディと高減速比のアクチュエータで駆動される関節で構成されており、その構造自体が俊敏な運動の実現を阻害するような設計がなされていた。そこで本研究では、生物の脚部の筋骨格構造を規範として、特に瞬発的な運動への貢献が大きな筋腱複合体を導入したロボットの脚機構を開発し、俊敏な運動の一例として垂直跳躍運動を取り上げて、生物規範機構の効果を活用するための運動制御手法を提案する。試作機を用いた実験を通して、提案した機構の運動への影響を検証する。</p> <p>本論文は全5章から構成され、その内容の要旨は以下の通りである。</p> <p>第1章 序論</p> <p>第1章では、本研究の研究背景と関連研究、目的について述べる。まず、社会的な背景を考慮して、脚式移動ロボットに要求する運動能力について説明し、従来の脚式移動ロボットの限界について説明する。次に、生物の高度な運動技能のメカニズムについて、生物の脚部に備わる筋腱複合体が弾性要素として機能し、生物の俊敏な運動に重要な働きを示すことを説明する。これらの生物工学の知見から、動物界でも特に優れた運動能力を持つネコ科の生物の脚部の筋骨格構造を参考に、脚式ロボットに生物の構造を規範とした機構を導入する利点について説明する。その後、生物規範機構を脚ロボットに導入した関連研究</p>	

について、関節構成や機構などの項目で分類し、本研究の立ち位置について言及したうえで、本研究の目的を述べる。最後に、生物の脚部の筋骨格構造でも重要な2つの筋腱複合体を取り上げ、生物規範脚機構の開発を軸とした本論文の構成を示す。

## 第2章 下腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発

第2章では、ネコ科の生物の後肢下腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構を提案する。対象とする筋腱複合体は、膝関節と足関節にまたがって二関節に作用するものであり、動的な運動においてエネルギーの蓄積と放出が行われている。この複合体の特に弾性要素としての機能に着目した脚機構について説明する。次に、この機構を搭載した一脚ロボットのモデルを構築し、このモデルを用いた垂直跳躍運動の軌道生成手法について説明する。最後に、生成された軌道に基づいて開発した試作機を用いて跳躍実験を行い、機構の効果について考察する。

## 第3章 大腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発

第3章では、ネコ科の生物の後肢上腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構を提案する。対象とする筋腱複合体は、股関節と膝関節にまたがって二関節に作用するものであり、脚の伸展運動への寄与が高いとされていることから、ワイヤ・プーリ駆動機構と弾性体を用いた生物規範機構を提案する。新たにモデルを構築し、第2章で提案した軌道生成手法を用いて垂直跳躍運動軌道を生成する。最後に、生成された軌道に基づいて、開発した試作機を用いて跳躍実験を行い、機構の効果について考察する。

## 第4章 大腿と下腿に生物規範機構を有する脚機構の開発

第4章では、第2章、第3章で導入した機構を併せ持つ生物規範型脚ロボットの設計と運動制御について述べる。2つの受動機構を有する本モデルでは、それぞれの機構の弾性特性の組み合わせがロボットの運動性能に大きく影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、異なる弾性特性の組み合わせを有する複数のモデルを用いて、第2章で提案した軌道生成手法を用いて垂直跳躍運動軌道を生成し、運動への機構の効果について検証する。これら2つの生物規範機構を搭載した脚ロボットを試作し、軌道生成の結果に基づいて垂直跳躍実験を行い、それぞれの機構の効果について考察する。

## 第5章 結論と今後の展望

第5章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題や展望について議論する。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 佐藤 隆紀

審査委員主査 明 愛国

委員 横井 浩史

委員 田中 一男

委員 内田 雅文

委員 田中 基康

脚式ロボットにおいて生物のような俊敏な運動を実現することは挑戦的な課題である。生物の高度な運動技能は、進化の中で最適化された身体の筋骨格構造の持つ柔軟性と、それらを協調的に利用する運動制御によって成し遂げられる。生物の筋骨格系の構成要素である筋腱複合体は、能動要素である筋と受動要素である腱が直列に接続され、関節を駆動するだけでなく、運動中にエネルギーの蓄積と放出を行う能力を持つ。走行や跳躍といった運動において、生物はその運動エネルギーを筋腱複合体の持つ弾性要素に弾性エネルギーを蓄積し、蹴り出しなどの高出力が要求される際に適切に放出して、俊敏かつ高効率な運動を実現していることが示唆されている。また、二関節にまたがるように配置された筋腱複合体は、大きな駆動源を持つ体幹から手足の先端へのエネルギーの伝達を可能にする。この機能は体幹から末梢につれて細く軽量になる生物のスマートな構造を形成するために重要であり、俊敏な動作の実現に大きく貢献する。一方で、これまでに開発された脚式移動ロボットは、制御の煩雑化を防ぎ、また設計を単純化するために、剛体のボディと高減速比のアクチュエータで駆動される関節で構成されており、その構造自体が俊敏な運動の実現を阻害するような設計がなされていた。そこで本研究では、生物の脚部の筋骨格構造を規範として、特に瞬発的な運動への貢献が大きな筋腱複合体を導入したロボットの脚機構を開発し、俊敏な運動の一例として垂直跳躍運動を取り上げて、生物規範機構の効果を活用するための運動制御手法を提案する。試作機を用いた実験を通して、提案した機構の運動への影響を検証する。本論文は全5章から構成され、その内容の要旨は以下の通りである。

第1章「序論」では、本研究の研究背景と関連研究、目的について述べる。まず、社会的な背景を考慮して、脚式移動ロボットに要求する運動能力について説明し、従来の脚式移動ロボットの限界について説明する。次に、生物の高度な運動技能のメカニズムについて、生物の脚部に備わる筋腱複合体が弾性要素として機能し、生物の俊敏な運動に重要な働きを示すことを説明する。これらの生物工学の知見から、動物界でも特に優れた運動能力を持つネコ科の生物の脚部の筋骨格構造を参考に、脚式ロボットに生物の構造を規範とした機構を導入する利点について説明する。その後、生物規範機構を脚ロボットに導入した関連研究につい

て、関節構成や機構などの項目で分類し、本研究の立ち位置について言及したうえで、本研究の目的を述べる。最後に、生物の脚部の筋骨格構造でも重要な2つの筋腱複合体を取り上げ、生物規範脚機構の開発を軸とした本論文の構成を示す。

第2章「下腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発」では、ネコ科の生物の後肢下腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構を提案する。対象とする筋腱複合体は、膝関節と足関節にまたがって二関節に作用するものであり、動的な運動においてエネルギーの蓄積と放出が行われている。この複合体の特に弾性要素としての機能に着目した脚機構について説明する。次に、この機構を搭載した一脚ロボットのモデルを構築し、このモデルを用いた垂直跳躍運動の軌道生成手法について説明する。最後に、生成された軌道に基づいて開発した試作機を用いて跳躍実験を行い、機構の効果について考察する。

第3章「大腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発」では、ネコ科の生物の後肢上腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構を提案する。対象とする筋腱複合体は、股関節と膝関節にまたがって二関節に作用するものであり、脚の伸展運動への寄与が高いとされていることから、ワイヤ・プーリ駆動機構と弾性体を用いた生物規範機構を提案する。新たにモデルを構築し、第2章で提案した軌道生成手法を用いて垂直跳躍運動軌道を生成する。最後に、生成された軌道に基づいて、開発した試作機を用いて跳躍実験を行い、機構の効果について考察する。

第4章「大腿と下腿に生物規範機構を有する脚機構の開発」では、第2章、第3章で導入した機構を併せ持つ生物規範型脚ロボットの設計と運動制御について述べる。2つの受動機構を有する本モデルでは、それぞれの機構の弾性特性の組み合わせがロボットの運動性能に大きく影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、異なる弾性特性の組み合わせを有する複数のモデルを用いて、第2章で提案した軌道生成手法を用いて垂直跳躍運動軌道を生成し、運動への機構の効果について検証する。これら2つの生物規範機構を搭載した脚ロボットを試作し、軌道生成の結果に基づいて垂直跳躍実験を行い、それぞれの機構の効果について考察する。

第5章「結論と今後の展望」では、本研究の成果をまとめ、今後の課題や展望について議論する。

以上本論文では、生物の脚部に備わる重要な筋骨格構造を参考に二関節間にまたがって弾性要素を配置した生物規範型の脚機構を提案し、その機構の効果を運動に活用するための運動軌道手法を考案した。動的な運動の一例として垂直跳躍運動の軌道を生成し、それに基づく実験を通して機構の効果を考察した。本研究で開発された生物規範機構はダイナミックな運動に貢献することがシミュレーションと実験の結果から示された。運動制御手法は目的の運動に合わせて評価関数を設定することで、様々な運動に応用することが可能である。その新規性、独創性および有用性は高く、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。